

Astrofisica e particelle elementari

aa 2010-11

Lezione 11

Ricerca diretta di materia oscura

Interazioni

Sezioni d'urto

Simmetrie e invarianze

Bruno Borgia

Esperimenti per la ricerca diretta di materia oscura

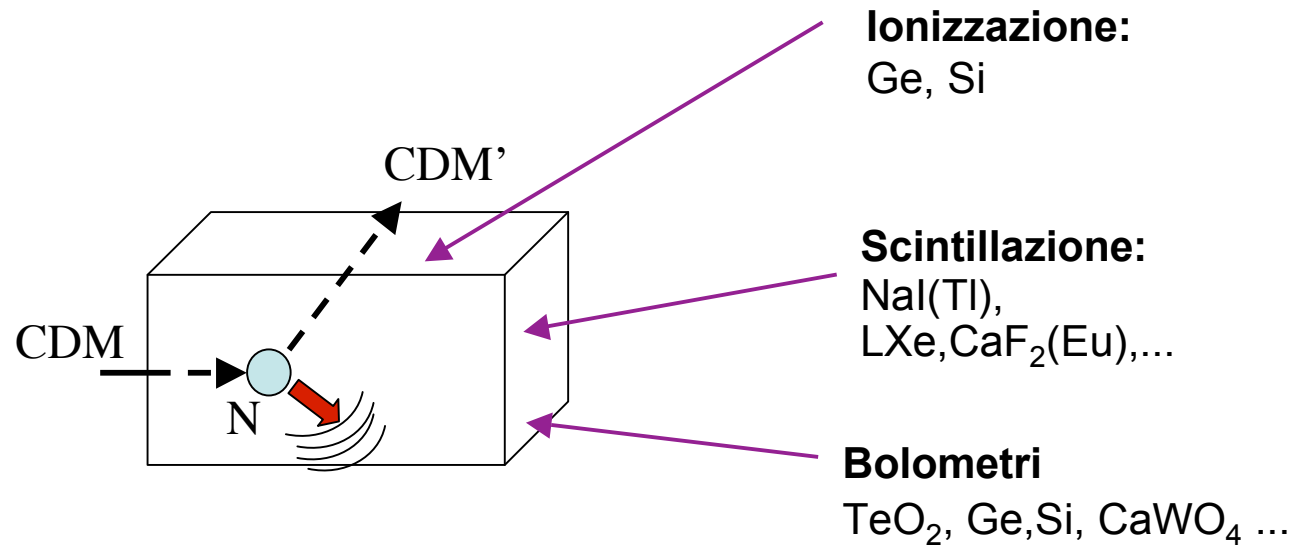
Strategia degli esperimenti per la rivelazione diretta

- **Soglia in energia nella regione del keV**, limitata in basso solo dal fondo.
- **Soppressione del fondo eccellente.** Uso di materiali a bassa radioattività, schermaggio efficiente in luoghi sotterranei, schermi attivi e passivi, discriminazione dei segnali elettrone/nucleo.
- **Grandi masse del bersaglio.**
- **Operatività stabile a lungo termine.**

Metodi sperimentali

- **Rivelatori bolometrici.** $T \approx 10\text{-}20$ mK, aumento della temperatura per effetto dell'interazione
 - CRESST (G. Sasso): 3Kg CaWO_4 , fononi e luce
 - EDELWEISS (Frejus): 9 Kg Ge, fononi e ionizzazione
 - CDMS (Soudan): 250 g Si, fononi e ionizzazione
- **Rivelatori Xe/Ar.** Rivelazione della scintillazione e della ionizzazione in gas nobili liquefatti.
 - Xenon10 (G.Sasso): 10 Kg Xe
 - ZEPLIN (Boulby): 10 Kg Xe
 - WARP (G.Sasso) Ar
- **Rivelatori NaI.** Scintillazione dai cristalli di NaI.
 - DAMA (G.Sasso) 100 Kg NaI $\Rightarrow$ 250 Kg
- **Rivelatori a liquido sovrariscaldato.** Gocce soprariscaldate disperse in gel subiscono nucleazione (cambiamento di fase in bolle gassose) per effetto del rinculo di un nucleo.
 - SIMPLE: C_2ClF_5
 - PICASSO: C_4F_{10}

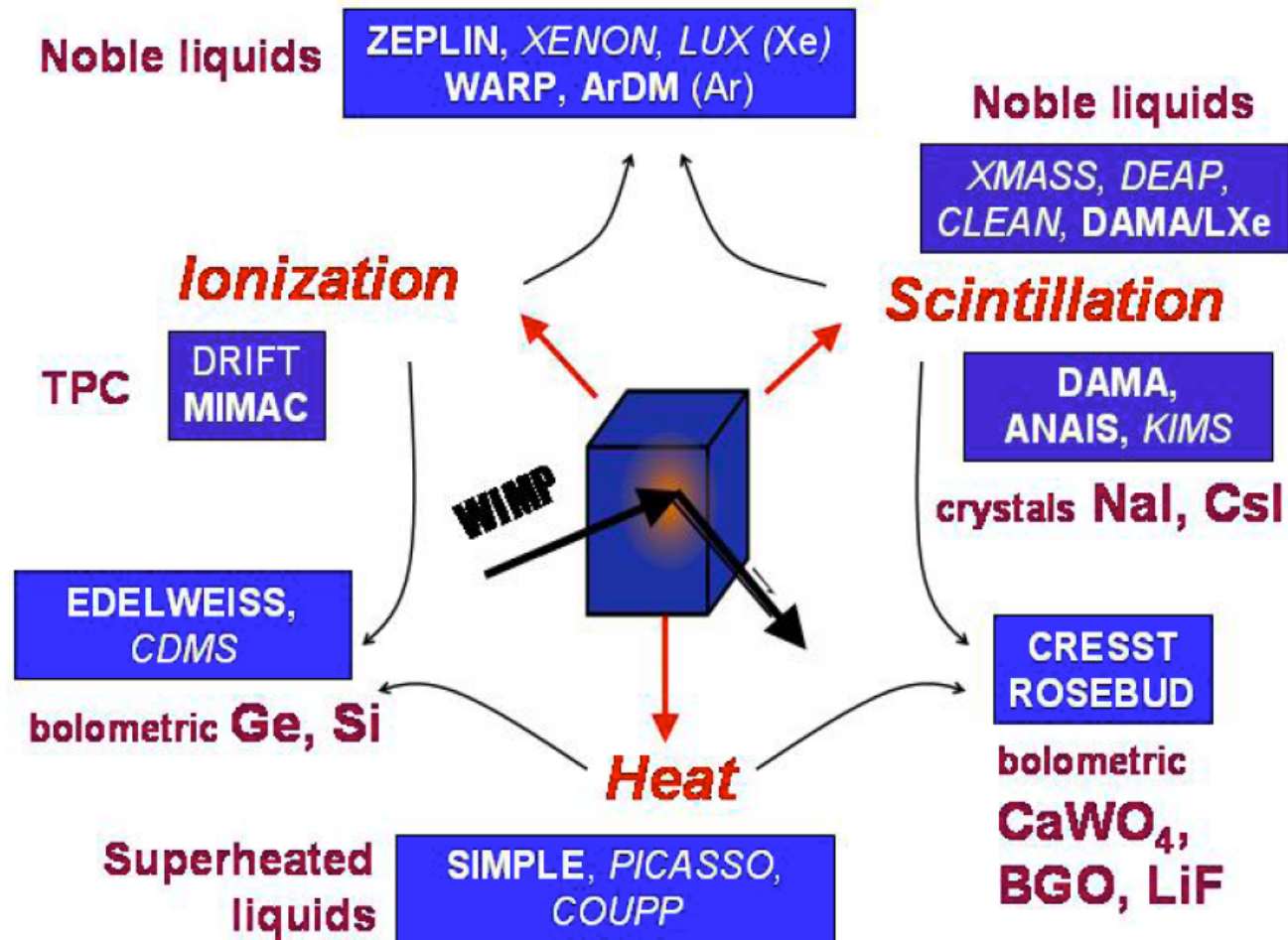
RIVELAZIONE DIRETTA



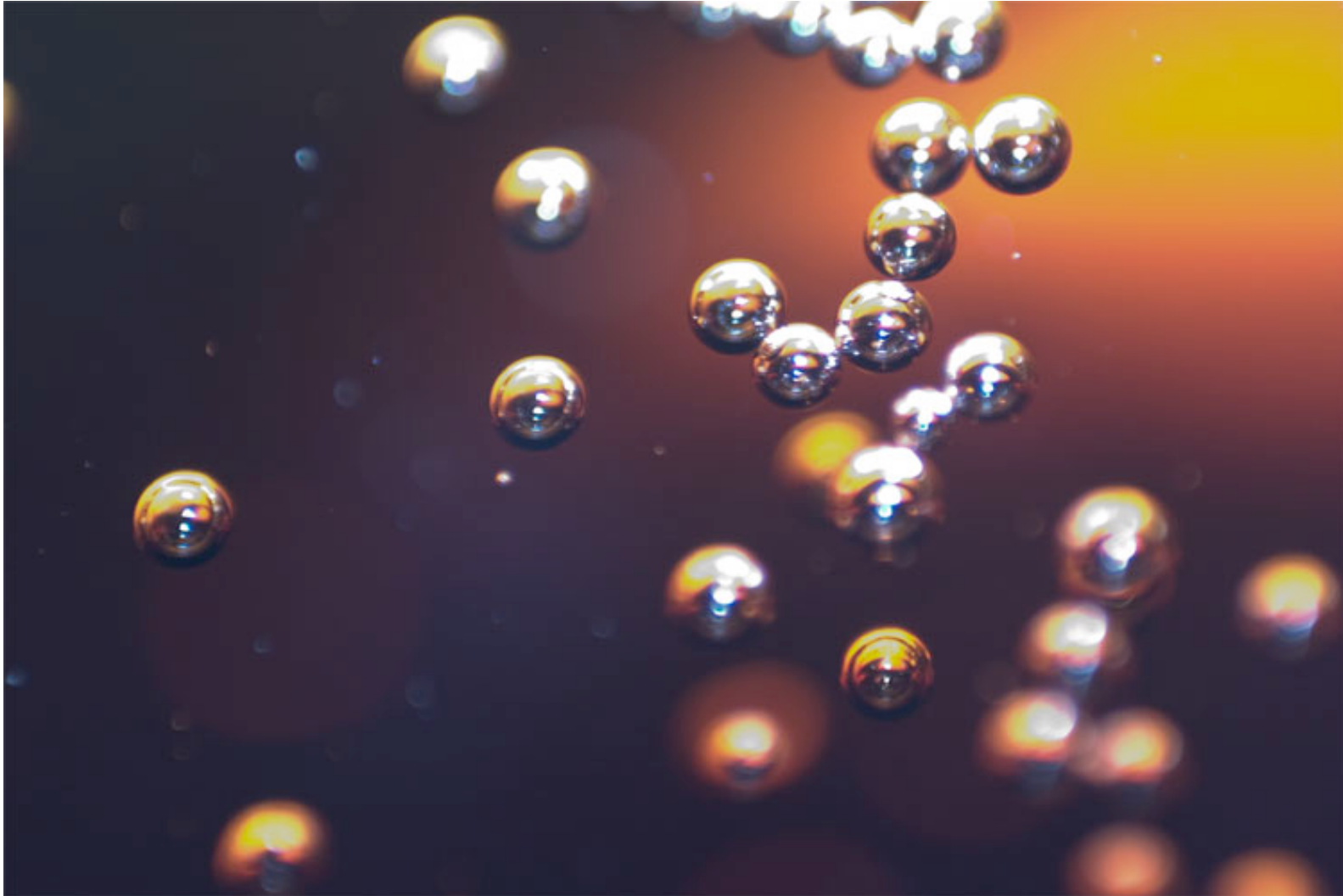
Carattere del segnale

- Modulazione annuale del segnale. cambiamento della velocità dei WIMP rispetto al rivelatore dovuto al moto della terra attorno al Sole e del Sole rispetto al centro della Galassia.
- Direzionalità. Distinzione del segnale rispetto al fondo terrestre con asimmetria avanti/indietro. Richiede un rivelatore capace di misurare la direzione del rinculo del nucleo, ovvero un rivelatore gassoso.
- Dipendenza dal bersaglio. Dipendenza dell'interazione del WIMP da diversi nuclei in frequenza e diversa forma dello spettro dell'energia di rinculo.

Metodi sperimentali per la ricerca diretta



Nucleazione di bolle di soda per effetto della diminuzione della pressione esterna



RIVELAZIONE DIRETTA

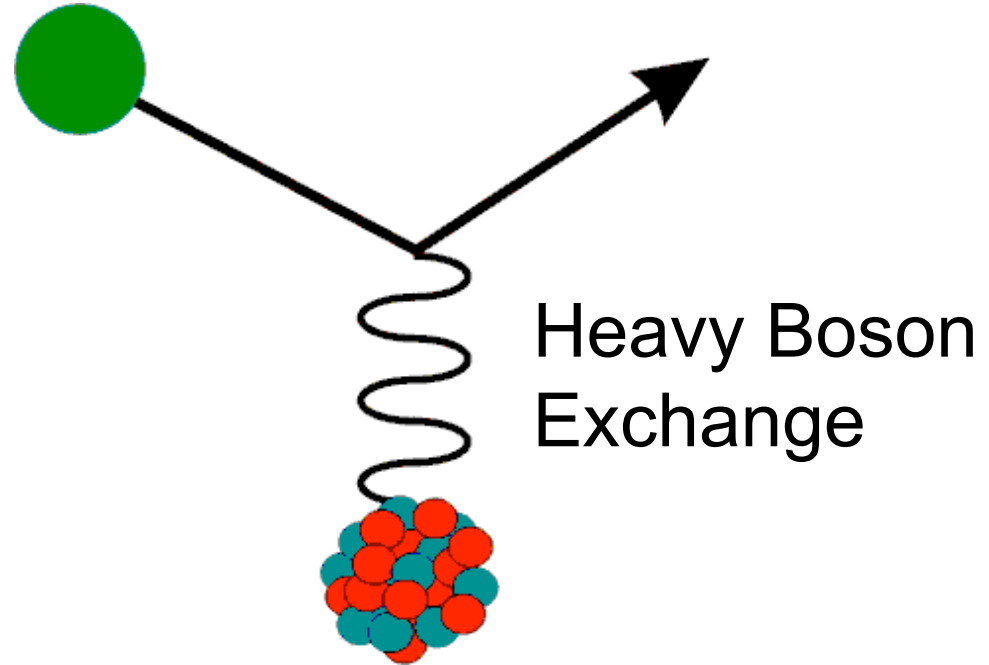
WIMP

$$30 < M_W [\text{GeV}] < 1000$$

$$46 < \lambda_W [\text{fm}] < 1.4$$

$$v_{\text{rms}} \sim 270 \text{ km/s}$$

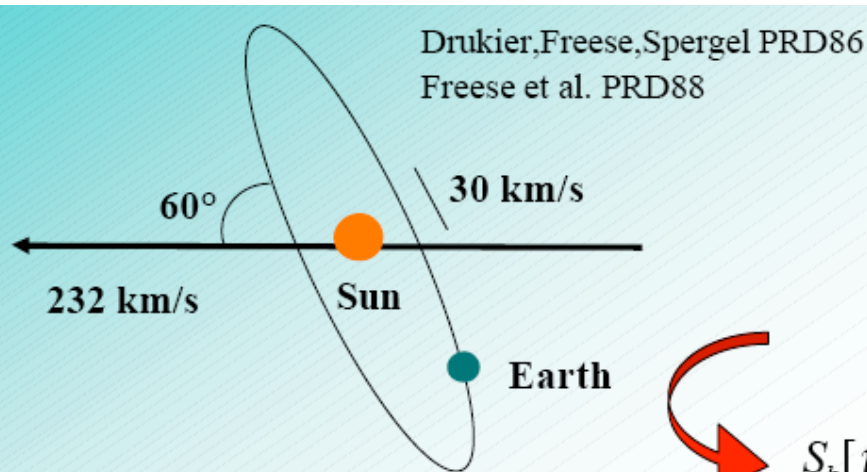
$$\rho_{\text{CDM}} \sim 0.3 \text{ GeV}/c^2 \text{ cm}^{-3}$$



$$E_R = E_0 \cdot \frac{4M_W M_N}{(M_W + M_N)} \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos \theta^*) \approx 0.4 \text{ keV} \cdot \frac{M_W}{\text{GeV}}$$

Direct detection via WIMP scattering by nuclei: $E_R \sim \text{tens of keV}$

MODULAZIONE ANNUALE DEI CONTEGGI



- $v_{\text{sun}} = 232 \text{ km/s}$ (Sun velocity in the halo)
- $v_{\text{orb}} = 30 \text{ km/s}$ (Earth velocity around the Sun)
- $\gamma = \pi/3$
- $\omega = 2\pi/T$ $T = 1 \text{ year}$
- $t_0 = 2^{\text{nd}} \text{ June}$ (when $v_{\oplus}$ is maximum)

$$v_{\oplus}(t) = v_{\text{sun}} + v_{\text{orb}} \cos\gamma \cos[\omega(t-t_0)]$$

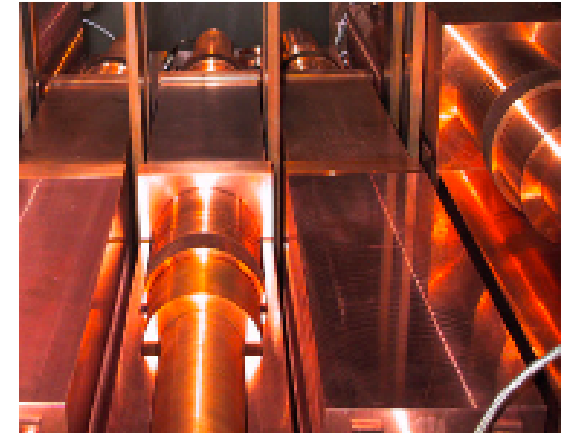
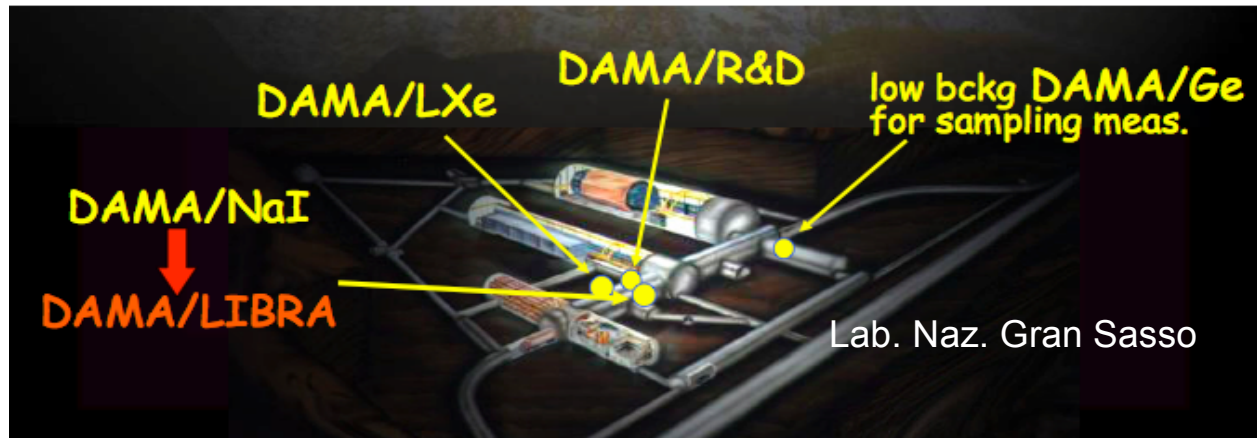
$$S_k[\eta(t)] = \int_{\Delta E_k} \frac{dR}{dE_R} dE_R \cong S_{0,k} + S_{m,k} \cos[\omega(t-t_0)]$$

Expected rate in given energy bin changes because the annual motion of the Earth around the Sun moving in the Galaxy

Requirements of the annual modulation

- 1) Modulated rate according cosine
- 2) In a definite low energy range
- 3) With a proper period (1 year)
- 4) With proper phase (about 2 June)
- 5) For single hit in a multi-detector set-up
- 6) With modulated amplitude in the region of maximal sensitivity $< 7\%$

Ricerca diretta - DAMA



- Detector a scintillazione, 100 Kg di NaI(Tl) (7 anni) + 250 Kg di NaI(Tl) (6 anni)
- Reduced standard contaminants by material selection and growth/handling protocols.
- Each crystal coupled - through 10cm long tetrasil-B light guides acting as optical windows - to 2 low background EMI9265B53/FL (special development) 3" diameter PMTs working in coincidence.
- Very low radioactive shields: 10 cm of copper, 15 cm of lead + shield from neutrons: Cd foils + 10/40 cm polyethylene/paraffin + ~ 1 m concrete moderator largely surrounding the set-up
- Walls, floor, etc. of inner installation sealed by Supronyl ($2 \cdot 10^{-11}$ cm²/s permeability).
- Each PMT works at single photoelectron level. Energy threshold: 2 keV (from X-ray and Compton electron calibrations in the keV range and from the features of the noise rejection and efficiencies)

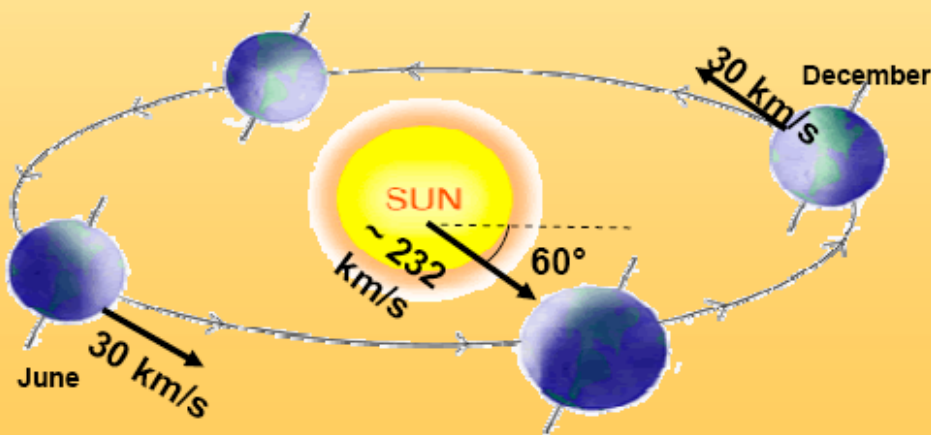
Costruzione di DAMA/Libra



Experimental *single-hit* residuals rate vs time and energy

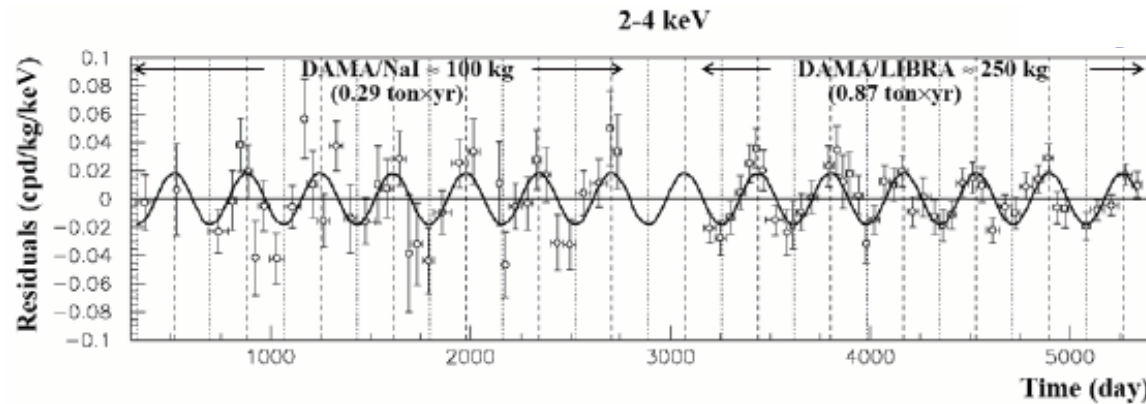
- Model-independent investigation of the annual modulation signature has been carried out by exploiting the time behaviour of the residual rates of the *single-hit* events in the lowest energy regions of the DAMA/LIBRA data.
- These residual rates are calculated from the measured rate of the *single-hit* events (obviously corrections for the overall efficiency and for the acquisition dead time are already applied) after subtracting the constant part:

$$\langle r_{ijk} - flat_{jk} \rangle_{jk}$$

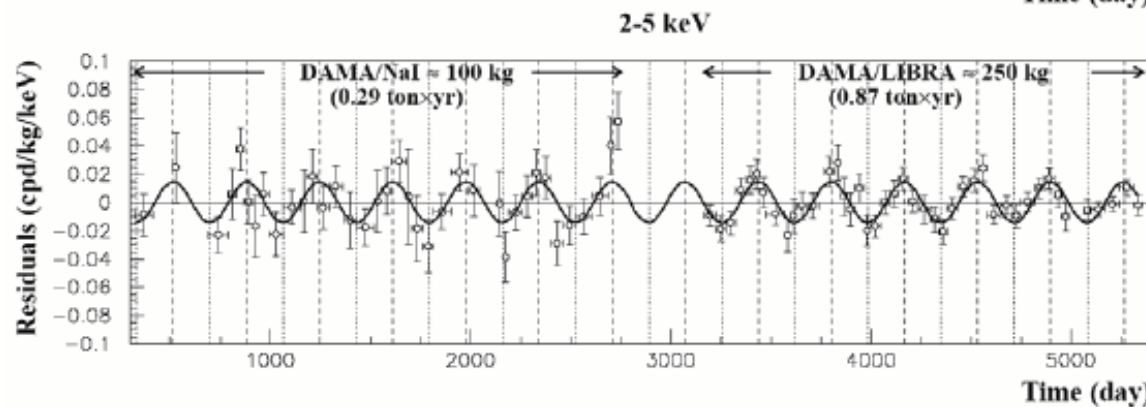


- r_{ijk} is the rate in the considered i -th time interval for the j -th detector in the k -th energy bin
- $flat_{jk}$ is the rate of the j -th detector in the k -th energy bin averaged over the cycles.
- The average is made on all the detectors (j index) and on all the energy bins (k index)
- The weighted mean of the residuals must obviously be zero over one cycle.

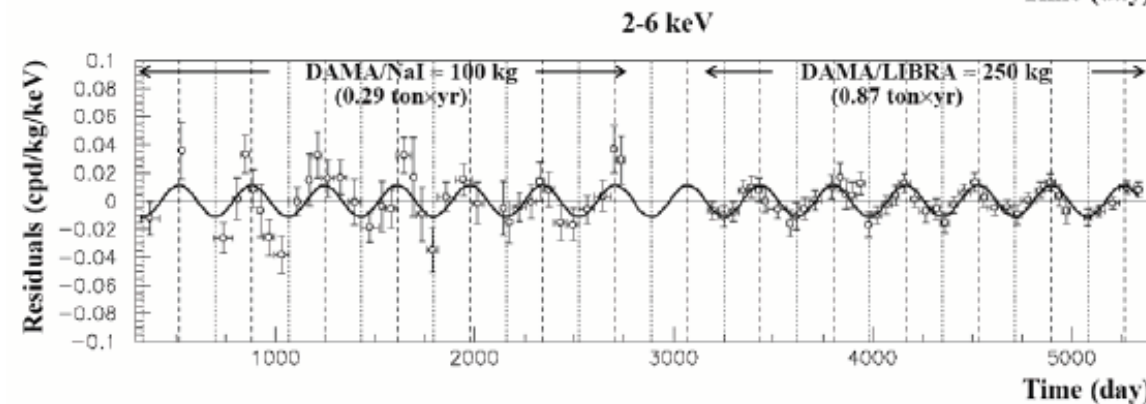
Modulazione annuale



8.3 σ CL



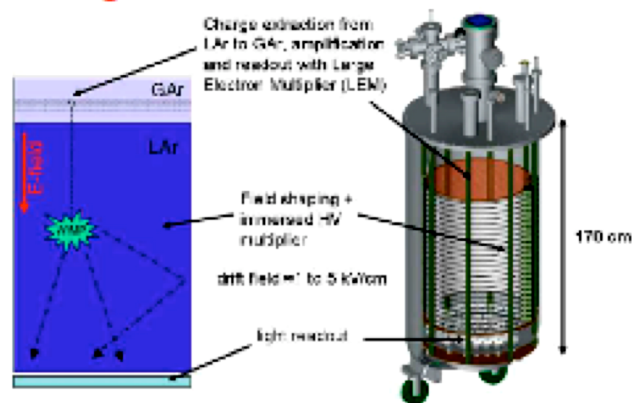
9.0 σ CL



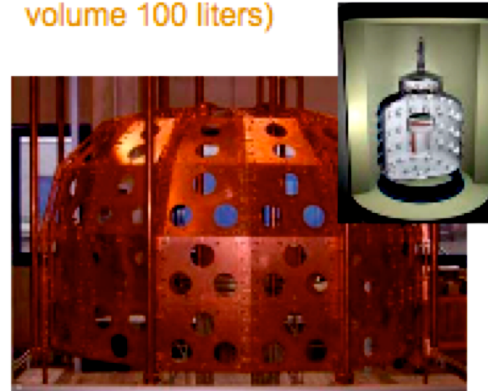
8.8 σ CL

Ricerca diretta - esperimenti in fase di realizzazione

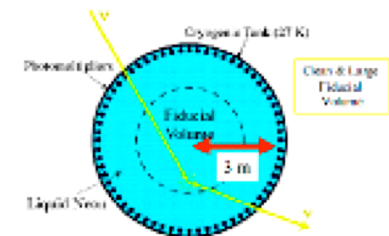
ArDM: ton scale dual-phase Argon detector



WARP: double phase Argon detector at LNGS (fiducial volume 100 liters)

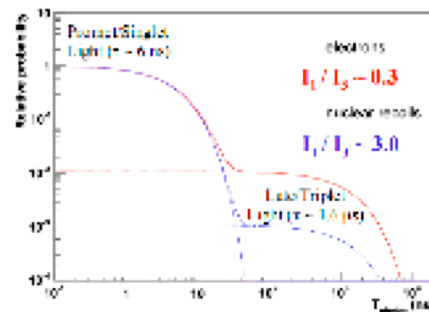


CLEAN: Cryogenic Low Energy Astrophysics with Neon

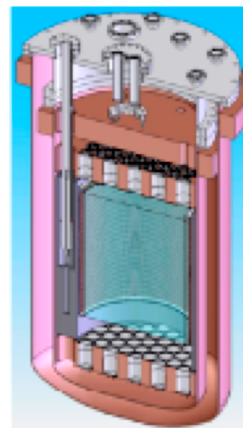


Single phase liquid Neon detector of tens of tons

DEAP (SNOLAB): scintillation light in LAr at 85K → PSD studying different lifetimes in singlet/ triplet states for electrons and nuclear recoil (ton scale)



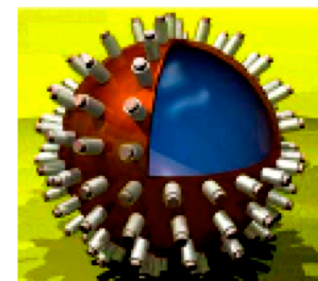
Lux: dual phase time projection chamber with 100 kg LXe (tot: 300 kg)



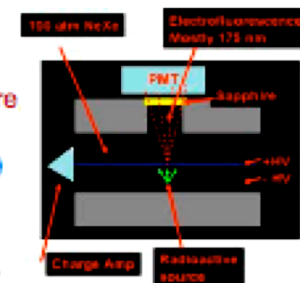
SIGN: A High-Pressure, Room-Temperature Gaseous-Neon-Based Underground Physics Detector (100 kg @ 100 atm towards 10 tons)

XMASS

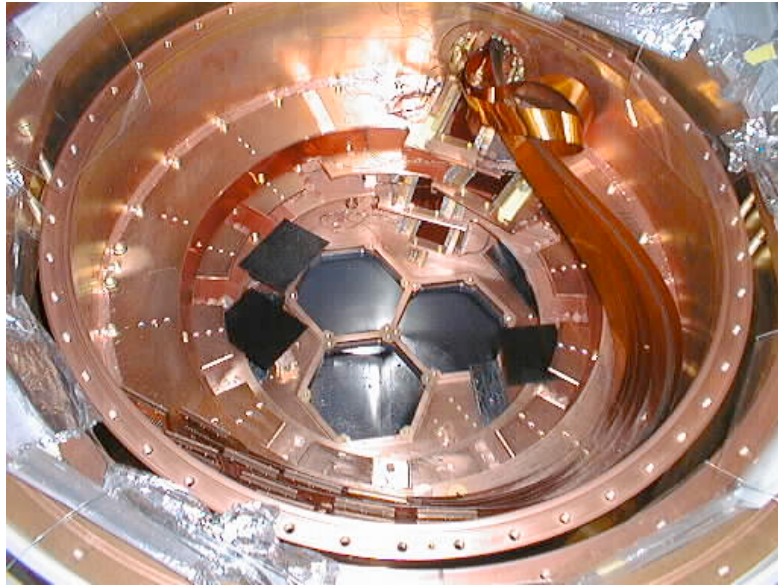
Solar ν : Xenon **MASS**ive detector for Solar neutrinos
 Dark M: Xenon detector for weakly interacting **MASS**ive Particles
 $\beta\beta$: Xenon neutrino **MASS** detector



- 10 ton liquid Xe
- 1350 3-in PMTs
- solar neutrinos by $\nu + e \rightarrow \nu + e$
- $\nu\beta\beta \sim 3.3 \times 10^{25}$ yr (5yr) ($m_{\nu} < 0.05-0.09$ eV)
- 30 DM ev/day for 100 GeV 10^4 pb SI for proton



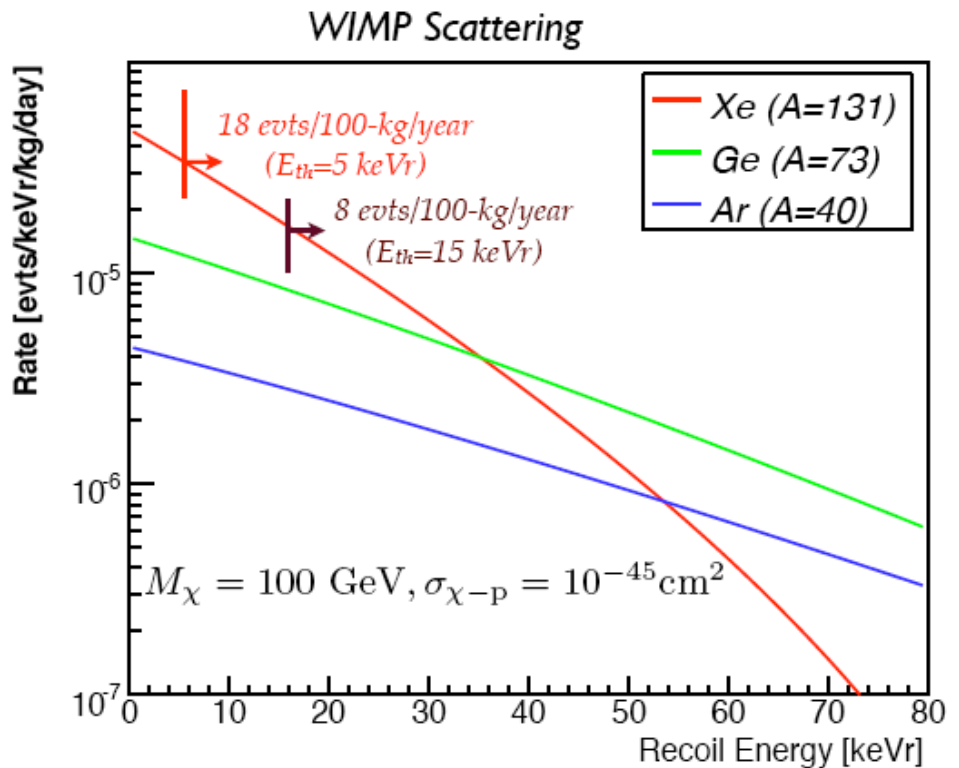
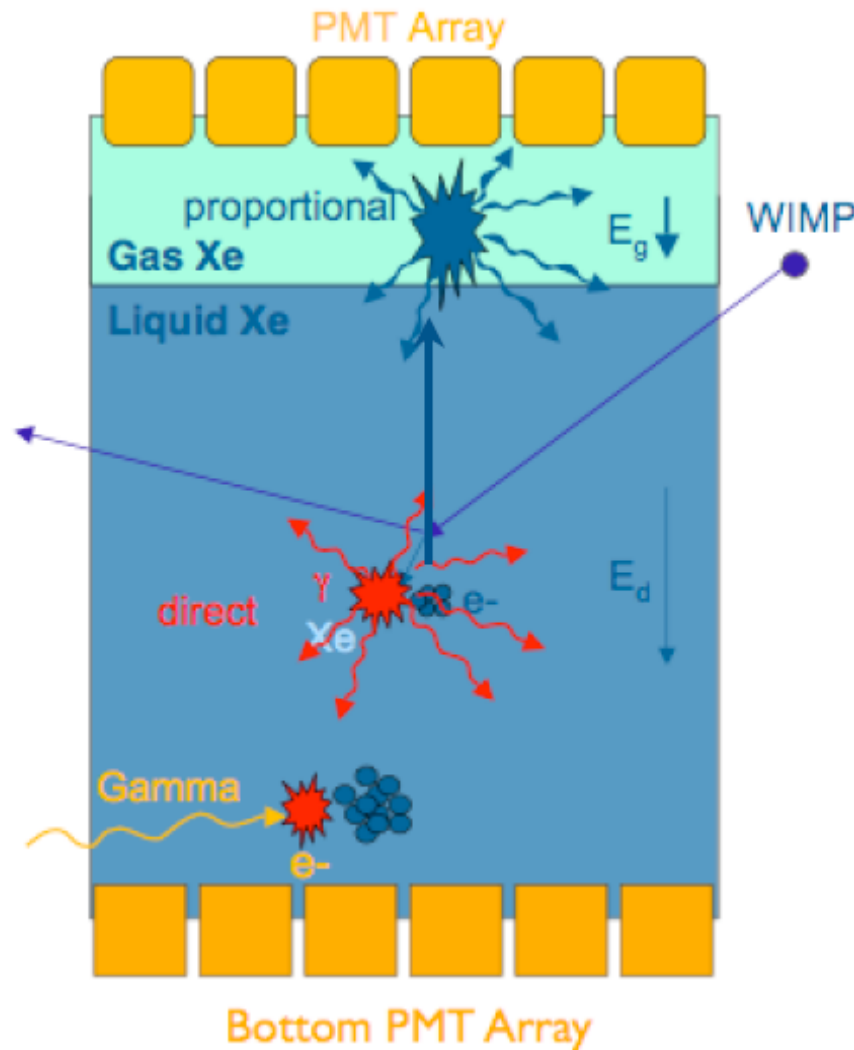
CDMS II



* A view of the inner layers of the cryostat. The hexagonal holes are the mounting points for the detector assembly and sits at 10 mK during operation. The surrounding layers are higher temperature stages of the cryostat. The cryostat is one-of-a-kind and was designed and built by the LBNL-UCB team. It is constructed entirely of radiopure copper to provide a low-radioactivity environment for the extremely sensitive CDMS detectors. The grey-black layer is a shield made of lead recovered from the ballast of a 18th-century French ship; the age of this lead ensures that the radioisotopes most worrying to CDMS have decayed away. In recent weeks, a polyethylene shield has been installed inside the lead layer; this new shield will attenuate the neutron flux by ~ 2.5 while allowing WIMPs to pass through. The observation of a reduced event rate after installation of this new shield will prove conclusively that CDMS detectors are seeing neutrons, not WIMPs.

* Closeup of a ZIP detector in its mount. A detector of this kind, made of Si, was operated in the 1998 run. The photolithographically-fabricated thin film on the surface is the phonon sensor and represents a significant advance over the detectors used in the 1999 run. Silicon and germanium ZIPs, weighing 100 g and 250 g respectively, will be used in future CDMS II runs at Stanford and in the Soudan mine.

XENON 100



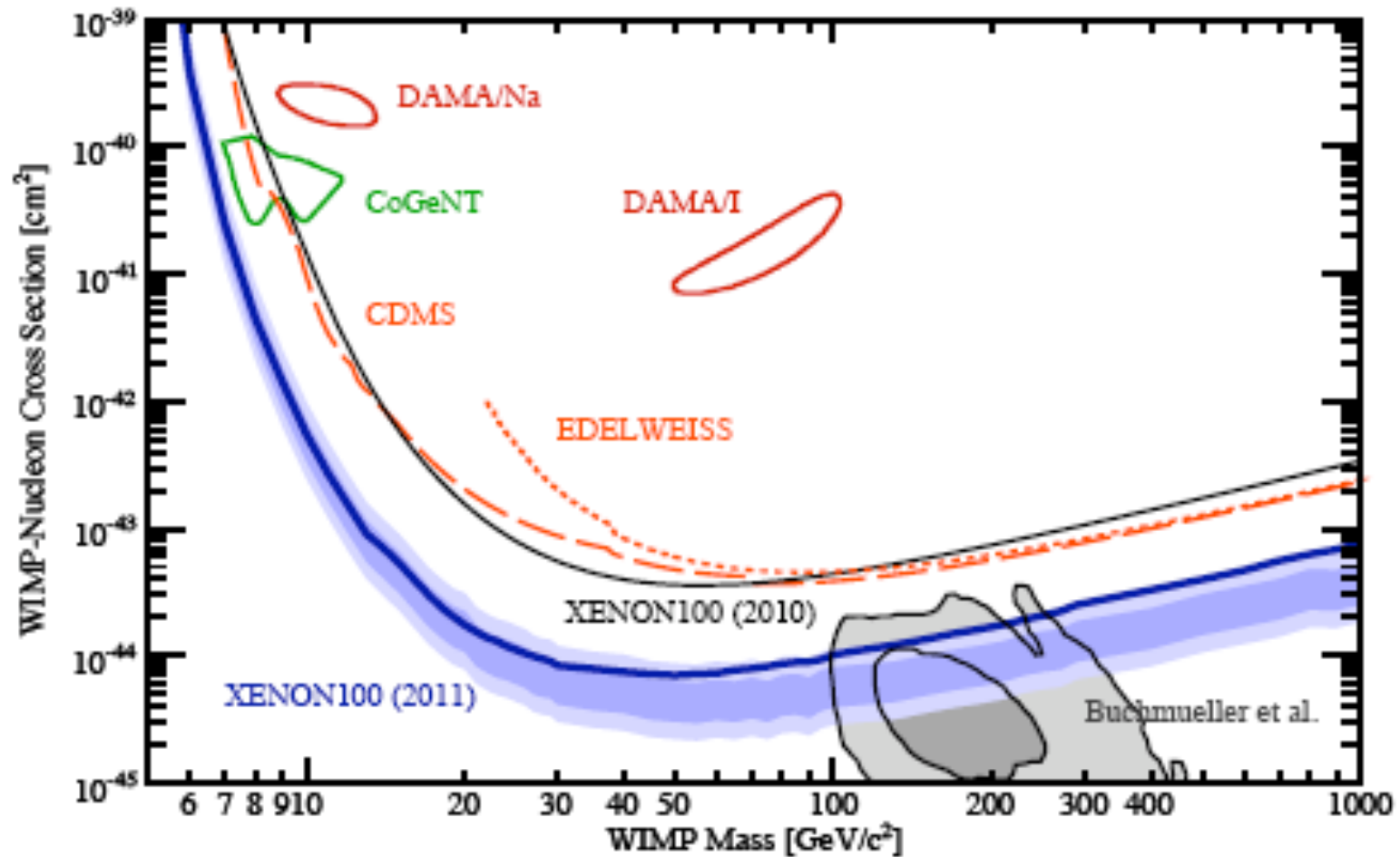
- 170 kg of LXe: the active target (65 kg) is surrounded on all sides by a 105 kg of LXe active veto
- TPC size: 30 cm drift x 30 cm diameter viewed by two arrays of PMTs with <1 mBq (U/Th) and $\sim 30\%$ QE (bottom array)

σ_{WIMP} elastica spin indipendente

E. Aprile, et al. (XENON Collaboration):

Dark Matter Results from 100 Live Days of XENON100 Data

<http://arxiv.org/abs/1104.2549>



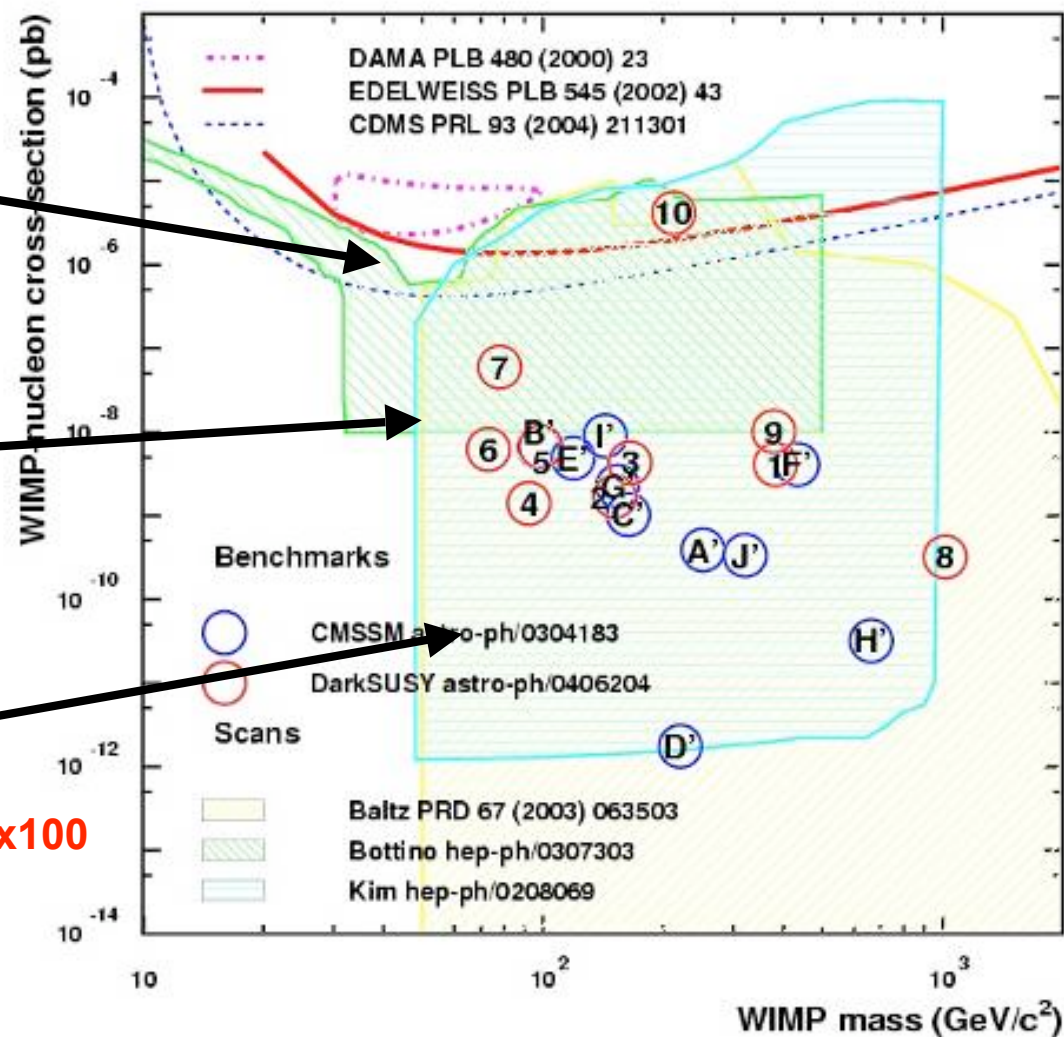
Buchmueller et al. (LHC) [arXiv:1102.4585v1](http://arxiv.org/abs/1102.4585v1)

ESPERIMENTI - PREDIZIONE MSSM

$\sigma = 10^{-6}$ pb:
~1 event/kg/day
~0.1 now reached

$\sigma = 10^{-8}$ pb:
~1 event/kg/year
Aims of phase II experiments

$\sigma = 10^{-10}$ pb:
~1 event/ton/year
Next generation requires further x100 improvement!



	DAMA/NaI	CDMS-II	Edelweiss-I	Zeplin-I	Cresst-II
Signature	annual modulation	none	none	none	none
Targets	^{23}Na , ^{127}I	$^{\text{nat}}\text{Ge}$	$^{\text{nat}}\text{Ge}$	$^{\text{nat}}\text{Xe}$	CaWO_4
Technique	widely known	poorly experienced	poorly experienced	liq/gas optical interface	poorly experienced
Target mass	≈ 100 kg	0.75 kg	0.32 kg	≈ 3 kg	≈ 0.6 kg
Exposure	$\sim(1.1 \times 10^5)$ kg $\times$ day (RivNCim 26 n1(2003)1-73)	19.4 kg $\times$ day (astro-ph/0405033)	30.5 kg $\times$ day (NDM03)	280 kg $\times$ day (Moriond03)	20.5 kg $\times$ day (astro-ph/0408006)
Expt. depth	1400 m	780 m	1700 m	1100 m	1400 m
Neutron shield	~ 1 m of concrete + 10/40 cm polyethylene/paraffin 1.5 mm Cd	50 cm polyethylene	30 cm paraffin	---	none
Energy threshold	2 keVee (5.5 - 7.5 p.e./keV)	10 keVee	20 keVee	2 keVee (but: $\sigma/E=100\%$ and 1 p.e./keVee!!!; IDM02) (2.5 p.e./keVee; Moriond03)	12 keVee
Quenching factor	measured	assumed 1	assumed 1 (see also NIMA507(2003)643)	measured	assumed 1
Measured evt rate in low energy range	~ 1 cpd/kg/keV	?? (claimed γ > than CDMS-I where ~ 60 cpd/kg/keV, 10^5 events)	$\sim 10^4$ events total	~ 100 cpd/kg/keV (IDM02)	(??) 6 cpd/kg/keV above 35 keVee
Claimed evts after rejection procedures		0 o 1	2 (claimed taken in a noisy period!)	~ 20 -50 cpd/kg/keV after filtering (Moriond03, IDM02)	16
Evts satisfying the signature in DAMA/NaI	modulation amplitude integrated over the given exposure some 10^3 evts	insensitive	insensitive	insensitive	insensitive

Esperimenti in corso e in progetto

Name	Type	Status	Location	European Members	Others
DAMA/LIBRA	NaI	running	LNGS	IT	China
ANAIS	NaI	construction	LSC	ES	-
KIMS	CsI	R&D	Korea	-	Korea
HDMS	Ge	running	LNGS	DE	RU
ROSEBUD	bolometer	R&D	LSC	ES, FR	-
DAMA-LXe	LXe scint	running	LNGS	IT	China
ZEPLIN-II	LXe	running	IUS	PT, UK	RU, US
ZEPLIN-III	LXe	installation	IUS	PT, UK	RU, US
XENON10	LXe	running	LNGS	DE, IT, PT	US
LUX	LXe	R&D	DUSEL	UK	US
XMASS	LXe	?	Kamioka	-	Japan
WARP	LAr	running	LNGS	IT	US
ArDM	LAr	construction	LSC	CH, ES, PO	-
DEAP	LAr	R&D	SNOLAB	-	Can, US
CLEAN	LNe	R&D	t.b.d.	-	US, Can
DRIFT	CS ₂ gas TPC	R&D	IUS	UK	US
MIMAC	³ He gas TPC	R&D	t.b.d.	FR	-
EDELWEISS	bolometer	running	LSM	FR, DE	RU
CRESST	bolometer	running	LNGS	DE, UK, IT,	-
CDMS	bolometer	running	Soudan	-	US
SIMPLE	Superheated droplet SHD	running + R&D	LSSB	PT, FR	US
PICASSO	SHD	running + R&D	SNOLAB	CZ	CA, RU, US
COUPP	SH liquid	R&D	t.b.d.	-	US

IUS - Boulby/UK
 LNGS - Gran Sasso/Italia
 LSM - Frejus/Francia
 LSC - Canfranc/Spagna
 LSSB - Bas Bruit/Francia

Particelle e interazioni

Adroni e leptoni

Possiamo distinguere le particelle *stabili* in due grandi categorie: adroni e leptoni

- Adroni: nuclei, protone, neutrone (stabile se legato nel nucleo)
- Leptoni: elettrone, positrone, neutrino
- Gli adroni sono particelle “composite”
- I leptoni sono particelle “puntiformi”
- La scoperta dei quark, particelle costituenti gli adroni, è avvenuta attraverso un processo sperimentale e teorico partendo dalla scoperta di numerose “risonanze” che hanno suggerito un modello basato sulla combinazione di 3 elementi. Successivamente gli esperimenti di diffusione ep a SLAC alla “Rutherford” hanno identificato costituenti elementari del protone e del neutrone: i partoni. I partoni venivano identificati a loro volta con i quark. La conferma è avvenuta con gli esperimenti all’anello di accumulazione Adone ed agli altri anelli.

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

Quark e colore

Nome	Spin	B	L	Q
u	1/2	1/3	0	+2/3
d	1/2	1/3	0	-1/3
e	1/2	0	1	-1
ν	1/2	0	1	0
γ	1	0	0	0
W	1	0	0	± 1
Z	1	0	0	0
g	1	0	0	0

Quark	Massa	Leptoni	Massa
u	330 MeV	e	0.51 MeV
d	330 MeV	ν_e	< 4 eV
c	1.5 GeV	μ	105.6 MeV
s	0.5 GeV	ν_μ	< 0.25 MeV
t	175 GeV	τ	1780 MeV
b	5 GeV	ν_τ	< 35 MeV

- Spin e statistica: $|\psi|^2$ è indipendente dallo scambio tra due particelle identiche.
- per una coppia di bosoni $\psi \rightarrow \psi$
- per una coppia di fermioni $\psi \rightarrow -\psi$
- Nello stesso stato quantico possono trovarsi due bosoni, ma non due fermioni
- Gell-Mann Zweig hanno proposto il modello a quark con tre costituenti di base.
- Il quark u ha tre versioni con le “cariche” di colore rosso, blu e verde (R,B,G). Poiché la simmetria di colore è esatta, le masse dei quark colorati sono esattamente le stesse. In natura le particelle sono “bianche” e quindi sono combinazioni appropriate dei colori o dei colori complementari: grigio-azzurro (ciano), magenta, giallo ($\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$)

$$p : RGB$$

$$\bar{p} : \bar{R}\bar{G}\bar{B}$$

$$\pi : R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}$$

Antiparticelle

- L'equazione di Klein Gordon si ottiene dalla relazione energia-momento relativistica sostituendo ad E e $\mathbf{p}$ gli operatori differenziali:

$$E^2 = \vec{p}^2 + m^2$$
$$\frac{-\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla^2 \phi = m^2 \phi$$

- Gli autovalori dell'energia sono

$$E = \pm(\vec{p}^2 + m^2)^{1/2}$$

ovvero con energia negativa e densità di probabilità negativa

Dirac ha ottenuto per i fermioni quattro soluzioni di cui due descrivono un fermione di spin $1/2$ con $E > 0$ e $t_1 \rightarrow t_2$, due con $E < 0$ e $t_2 \rightarrow t_1$.

Le soluzioni ad energia negativa sono interpretabili con un fermione di carica opposta che viaggia nella direzione positiva con energia positiva.

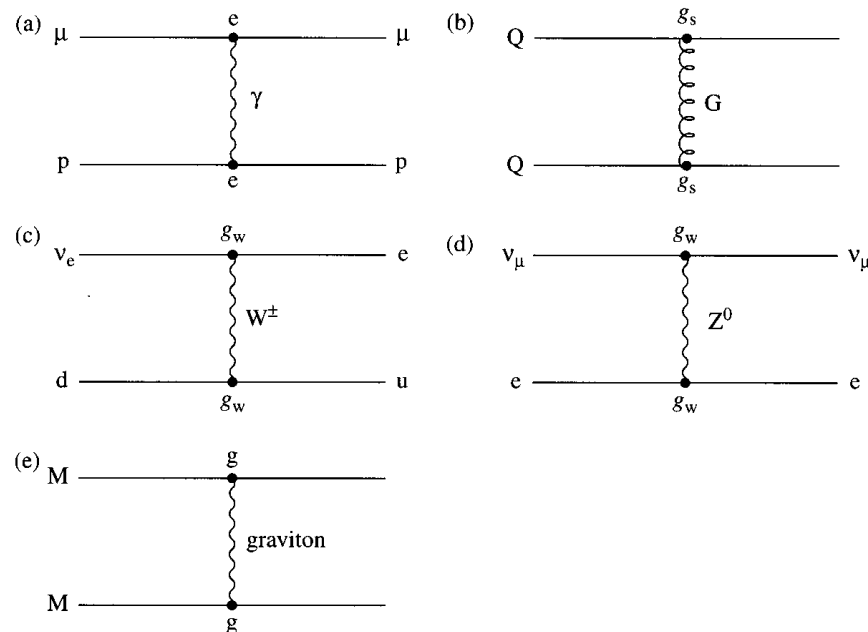
I fermioni sono creati e distrutti in coppie particella-antiparticella. Ad esempio in un collider si ha $e^+ e^- \rightarrow \gamma + \gamma$. Anche $\gamma + N \rightarrow e^+ + e^-$.

Interazioni fondamentali

- Le interazioni tra leptoni e quark avvengono tramite lo scambio di un bosone mediatore caratteristico di ogni tipo di interazione.

Interazione	Mediatore	Massa	Intensità relativa	Q
elettromagnetica	fotone	0	10^{-2}	0
forte	gluone	0	1	0 (colore!)
debole	W Z	80-92 GeV	10^{-7}	± 1 0
gravitazionale	gravitone	0 (spin 2)	10^{-39}	0

Le interazioni sono rappresentate graficamente dai seguenti diagrammi.



Cinematica, variabili di Mandelstam

Invarianti relativistici nei processi $a + b \rightarrow c + d$:

Se p_i ($i = a, b, c, d$) sono i quadri-vettori impulso energia, avremo

$$p_a + p_b = p_c + p_d \quad (*)$$

I possibili invarianti relativistici che si ottengono dai p_i sono i prodotti scalari a due a due. Poiché vale la (*) e la relazione $p_i^2 = m_i^2$, solo due invarianti su tre sono indipendenti.

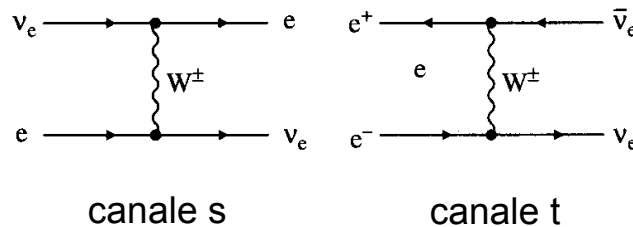
Gli invarianti che si possono costruire a partire dai prodotti scalari, si distinguono i seguenti:

$$s = (p_a + p_b)^2 \quad \text{energia al quadrato del processo diretto}$$

$$t = (p_a - p_c)^2 \quad \text{energia al quadrato del processo } \bar{d} + b \rightarrow c + \bar{a}$$

$$u = (p_a - p_d)^2 \quad \text{energia al quadrato del processo } a + \bar{d} \rightarrow c + \bar{b}$$

Esempio $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$



Scambio del bosone

- Nell'interazione di un elettrone con un altro elettrone attraverso lo scambio di un fotone, l'elettrone cede al fotone un'energia ΔE ed un momento Δp . Si ha

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad c = 1$$

$$\Delta E \cdot E = \Delta p \cdot p$$

$$\Delta m^2 = \Delta E^2 - \Delta p^2 = -\frac{m^2 \Delta p^2}{E^2} < 0$$

- Il fotone ha massa immaginaria ed energia ΔE per un tempo Δt tale che $\Delta E \Delta t < h/2\pi$.
- La quantità Δm^2 è definita nel sistema di riferimento del fotone scambiato ed è quindi relativisticamente invariante. Si chiama momento trasferito quadrato e si indica con q^2 .
- Se ΔE è grande, il raggio d'azione dell'interazione è piccolo perché $c\Delta t < h/2\pi E$, come avviene nelle interazioni deboli, data la massa del W e dello Z.
- Yukawa ha mostrato che il potenziale di interazione dovuto ad un bosone a spin 0 di massa M ha la forma

$$V(r) \propto \left(\frac{1}{r}\right) \exp\left(\frac{-r}{r_0}\right) \quad \text{con } r_0 = \frac{hc}{2\pi M c^2}$$

- Poiché il raggio d'azione effettivo delle forze nucleari è dell'ordine di 1 fm = 10^{-13} cm, Yukawa predisse la massa del mesone ≈ 200 MeV/c².

$$\hbar = 6.6 \times 10^{-25} \text{ GeV s}$$

Propagatore

- L'ampiezza di scattering di una particella contro un'altra particella è proporzionale alle costanti di accoppiamento delle particelle con il bosone mediatore ed al propagatore che caratterizza le proprietà del bosone.
- Interazione elettromagnetica $e^2=4\pi\alpha\hbar c$ (in unità naturali) $=4\pi\alpha$ $\alpha\approx 1/137$
- Interazione forte $\alpha_s(Q^2)=\frac{12\pi}{(33-2n_f)\log(Q^2/\Lambda^2)}$
- Interazione debole $G_F=g_W^2/(-q^2+M_W^2)=1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$; $g_W=e$
- Interazione gravitazionale $GM^2/4\pi\hbar c=5.3 \times 10^{-40}$

massa di Planck $M_P = (\hbar c/G)^{1/2} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2 \approx 2 \times 10^{-2} \text{ mg}$

lunghezza di Planck $L_P = \hbar/M_P = 1.6 \times 10^{-35} \text{ m} = 1.6 \times 10^{-20} \text{ fm}$

Propagatore

- Dall'equazione di Klein Gordon per un potenziale statico e radialmente simmetrico si ricava la soluzione già anticipata per $V(r)$.
- L'ampiezza di scattering sarà la trasformata di Fourier del potenziale. Il risultato è

$$f(q^2) = [gg_0/(m^2 - q^2)]$$

g : costante di accoppiamento col potenziale;

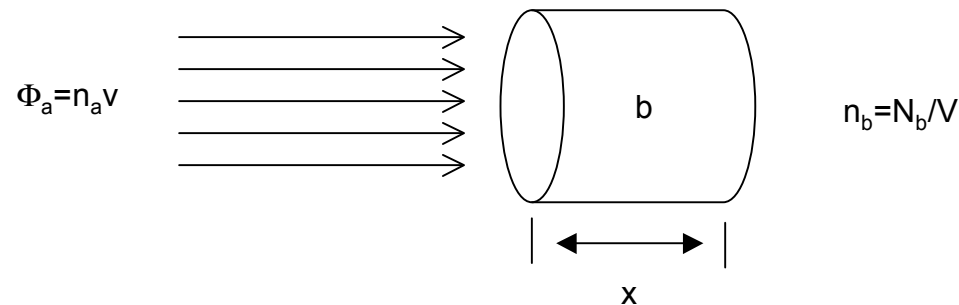
g_0 : costante integrazione

$c=1$; $\hbar/2\pi=1$

Per un fotone, il propagatore è $1/-q^2$

Sezione d'urto di interazione

- Reazione $a+b \rightarrow c+d$



n_a : n. particelle incidenti/volume
 v : velocità particelle
 n_b : n. particelle bersaglio/volume

La frequenza di interazioni sarà

$$\frac{dN}{dt} = \Phi_a \sigma n_b x$$

dove σ è la sezione d'urto del processo, circa l'area effettiva di ciascun particella bersaglio.

La sezione d'urto è misurata in cm^2 o meglio in barn:

$$1\text{b} = 10^{-24} \text{ cm}^2; \quad 1\text{mb} = 10^{-27} \text{ cm}^2; \quad 1 \text{ fm}^2 = 10 \text{ mb}$$

Probabilità di interazione

La probabilità di interazione per particella bersaglio è $W = \Phi \sigma$ che si può calcolare conoscendo gli elementi di matrice di transizione tra lo stato iniziale e finale T_{if} ovvero

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} |T_{if}|^2 \frac{dN}{dE_f}$$

$$T_{if} = \int \psi_f^* U \psi_i dV$$

U : potenziale di interazione

dN/dE_f : densità di energia degli stati finali

(Seconda regola d'oro di Fermi.)

La sezione d'urto differenziale per particelle relativistiche si scrive

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{|T_{if}|^2 s}{64\pi^2}$$

s : energia al quadrato nel centro di massa

La diminuzione delle particelle incidenti dopo l'attraversamento del bersaglio è

$$dn = -n_a \sigma n_b dx$$

Integrando si ha

$$n(x) = n_a \exp(-\sigma n_b x) = n_a \exp(-x/\lambda)$$

$$\lambda = 1/\sigma n_b$$

è il cammino libero medio.

$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma; \gamma\gamma \rightarrow e^+e^-; \gamma e \rightarrow \gamma e$$

- Processi di interesse astrofisico.
- Nel limite $s \gg m_e^2$ le sezioni d'urto hanno la forma:

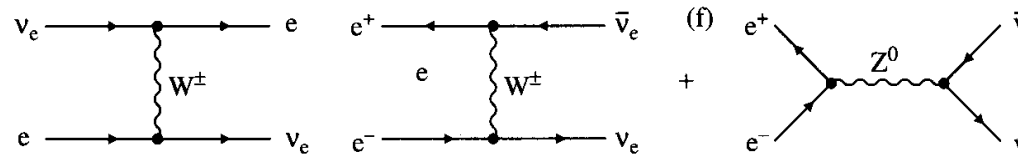
$$\sigma = \left(\frac{2\pi\alpha^2}{s} \right) \left[\ln \left(\frac{s}{m^2} \right) - 1 \right]$$

$$\sigma = \left(\frac{4\pi\alpha^2}{s} \right) \left[\ln \left(\frac{s}{m^2} \right) - 1 \right]$$

$$\sigma = \left(\frac{2\pi\alpha^2}{s} \right) \left[\ln \left(\frac{s}{m^2} \right) + \frac{1}{2} \right] \quad \text{scattering Compton}$$

Interazioni deboli

- Processi con scambio dei bosoni vettoriali W e Z.



Nell'ampiezza di transizione della diffusione $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$ il contributo principale è dato dallo scambio del W. Il propagatore $1/(|q^2|+M^2)$ per energie non troppo alte (<1 TeV) si riduce a $1/M^2$ con M, massa del W, pari a ≈ 80 GeV.

La sezione d'urto è $\sigma \approx g_W^4 s/M^4 \approx G_F^2 s$

dove G_F è la costante di Fermi ed s è l'energia nel CM al quadrato.

Decadimenti e risonanze

- $a \rightarrow b+c$, a instabile con frequenza di decadimento $W=1/\tau$. τ : vita media
- Per il principio di indeterminazione la massa della particella è definita con una larghezza $\Gamma = \hbar W = \hbar / \tau$.

- $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \text{ antiv}_\mu$ $\Gamma = G_F^2 m_\mu^5 / 192 \pi^3$ $\tau = 2.2 \mu s$
 $m_\mu = 105.7 \text{ MeV}/c^2$ $\rightarrow$ $G_F = ?$

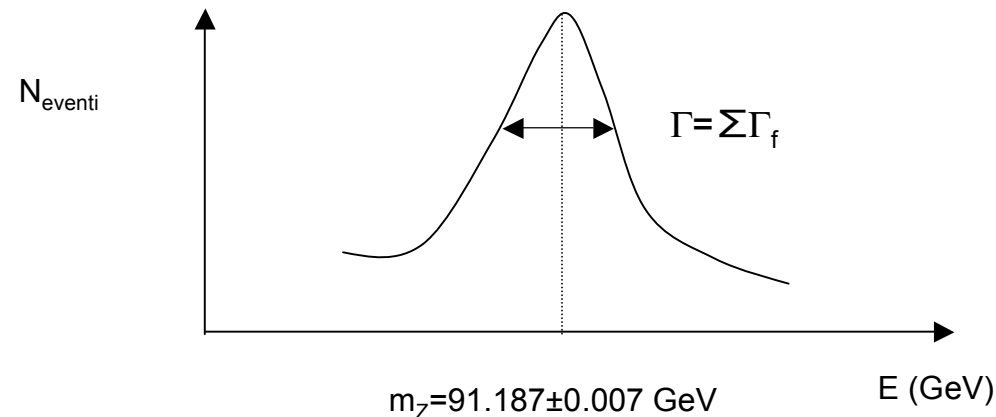
- Se la vita media è estremamente breve, la particella instabile ha una larghezza misurabile e si definisce risonanza.
- Le risonanze si osservano nella loro formazione, dalle collisioni tra particelle in cui decadono.
- La sezione d'urto nel processo di formazione ha la forma

$$\sigma(E) = \sigma_{\max} \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_R)^2 + \Gamma^2/4}$$

La formulazione che tiene conto anche degli spin delle particelle si chiama formula di Breit e Wigner.

Risonanze

- Nella Breit e Wigner, la larghezza Γ è la larghezza totale, ovvero la somma delle larghezze parziali per ogni canale di decadimento della risonanza.
- La Z ha tutti i canali di decadimento in coppie di leptoni e coppie di quark. La larghezza della risonanza nella formazione $e^+ e^- \rightarrow Z$ dipende dal numero di neutrini con massa inferiore alla metà della massa dello Z.



La risonanza $\Delta(1232)$

- La prima risonanza osservata fu la risonanza $\pi^+ p$ da Anderson Fermi e collaboratori al ciclotrone di Chicago nel 1952.
- $m = 1232 \text{ MeV}/c^2$ $\Gamma = 120 \text{ MeV}$ $\sigma_{\text{max}} = 200 \text{ mb}$
- Protoni di energia superiore a 10^{20} eV interagiscono col fondo cosmico di microne e possono eccitare questa risonanza. Questo meccanismo porterebbe alla soppressione dei raggi cosmici al di sopra di 10^{20} eV , effetto GKZ (Greisen, Kuzmin, Zatsepin).
- Successivamente furono scoperte numerose risonanze mesoni-barioni, mesoni-mesoni e lo studio sistematico dei loro numeri quantici, spin e spin isotopico hanno stimolato la necessità di dare una classificazione.
- Sakata prima, Gell-Mann e Zweig proposero nel '64 il modello a quark.

La risonanza $\Delta(1232)$

